

А. О. Гуслистий[✉], В. А. Горбань

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010*

КОЛЬОРОВІ ПОКАЗНИКИ ЯК ПАРАМЕТРИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВМІСТУ ОРГАНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ У ҐРУНТАХ

Вивчення хімічних, фізичних та біологічних властивостей ґрунту важливо для теоретичного та практичного ґрунтознавства. Дослідження властивостей ґрунту, зокрема визначення вмісту органічного вуглецю, вимагає великих витрат часу і коштів. Ефективне вимірювання ґрунтового органічного вуглецю необхідне для управління функціонуванням екосистем. Органічний вуглець має важливий вплив на властивості ґрунту, а також відіграє ключову роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, оскільки вуглекислий газ (CO₂) може видалятися з атмосфери і зберігатися в ґрунті, тим самим зменшуючи ефект потепління. Колір є однією з ключових характеристик ґрунту, який може бути швидко проаналізований і має тісний зв'язок з рядом інших фізичних та хімічних показників ґрунту. Згідно з дослідженнями вітчизняних та закордонних вчених ґрунти є основним місцем збереження ґрунтового вуглецю, який відіграє важливу роль у глобальному циклі вуглецю. З технологічним прогресом і розвитком систем отримання зображень методи визначення характеристик ґрунту на основі зображень привернули значну увагу світової ґрунтознавчої спільноти. На відміну від спектроскопії ґрунту, пристрої для отримання зображень, такі як цифрові фотоапарати або камери телефонів, легко доступні. Традиційно колір ґрунту визначається кількісно за допомогою кольорової системи Манселла, яка вимагає суб'єктивного візуального порівняння, але останнім часом зарубіжні вчені почали використовувати кольорові схеми RGB, CMYK, HSB, визначення яких доступне майже у всіх комп'ютерних графічних редакторах.

Ключові слова: ґрунтовий органічний вуглець, колір ґрунту, прогнозування ГОВ.

A. O. Huslystyj[✉], V. A. Gorban

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

COLOR INDICATORS AS PARAMETERS FOR PREDICTING THE CONTENT OF ORGANIC CARBON IN SOILS

The study of chemical, physical and biological properties of soil is important for theoretical and practical soil science. The study of soil properties, in particular the determination of organic carbon content, requires a lot of time and money. Effective measurement of soil organic carbon is necessary to manage the functioning of ecosystems. Organic carbon has an important effect on soil properties and also plays a key role in mitigating the effects of climate change, as carbon dioxide (CO₂) can be removed from the atmosphere and stored in the soil, thereby reducing the warming effect. Soil color is one of the key soil characteristics that can be quickly analyzed and

[✉] E-mail: Guslistyj@i.ua

is closely related to a number of other physical and chemical soil parameters. According to the researches of domestic and foreign scientists, soils are the main storage place for soil carbon, which plays an important role in the global carbon cycle. With technological progress and the development of imaging systems, image-based soil characterization methods have attracted considerable attention from the global soil science community. Unlike soil spectroscopy, imaging devices such as digital cameras or phone cameras are readily available. Traditionally, soil color is quantified using Munsell's color system, which requires subjective visual comparison, but recently foreign scientists have begun to use RGB, CMYK, HSB color schemes, the definition of which is available in almost all computer graphics editors. With the increase in the use of smartphones and the gradual improvement of the quality of photo images, the use of smartphone photos to predict organic carbon content shows great potential for development. Unlike face recognition and other recognition methods that mainly rely on object profiles, color is one of the most important factors in determining the accuracy of organic carbon prediction. Different hardware configurations and hardware software settings may cause differences in photo colors.

Key words: soil organic carbon, soil color, SOC prediction.

Вступ

Ґрунтова органічна речовина (ГОР) в значному ступені визначає якість ґрунту, ріст рослин та стан екосистем. Досягнення швидких і точних вимірювань вмісту ГОР має важливе значення для розробки політики та управління земельними ресурсами [11, 27]. Крім того, оскільки ґрунт є одним із найбільших земних резервуарів вуглецю [20], розкладання ґрунтової органічної речовини може мати двонаправлений вплив на глобальне потепління, тому своєчасна оцінка вмісту ГОР є ключовим фактором у визначенні викидів парникових газів [5]. Відомо, що за допомогою фотосинтезу рослина витягує вуглець з повітря, утворюючи вуглецеві сполуки [6]. Те, що рослині не потрібно для росту, виділяється через коріння для харчування ґрунтових організмів, в результаті вуглець гуміфікується або стає стабільним [38]. Запаси ґрунтового органічного вуглецю залежать від типу землекористування, при цьому його максимальні запаси характерні для ґрунтів лісу порівняно з ґрунтами пасовища, кормових та зрошувальних земель [28]. Крім того, органічний вуглець є необхідним для живлення рослин, а також покращує агрегатну структурованість ґрунту [15]. Зіткнувшись із величезними потребами у визначенні вмісту ГОР, традиційні методи вимірювання, які є дорогими, трудомісткими та тривалими, не можуть задовольнити вимоги щодо використання. [27]. Ґрунтуючись на зв'язку ґрунтової органічної речовини зі спектрами ґрунту, закордонні вчені провели дослідження швидкого вимірювання вмісту ГОР на основі гіперспектрального обладнання, яке тепер доведено як екологічно безпечний, неруйнівний і точний метод [4, 30]. Однак складність і вартість цього професійного обладнання обмежують потенційну сферу його використання [9, 14, 41].

Використання кольору ґрунту в ґрунтознавстві. Колір визначається як діагностичний критерій у всій таксономії ґрунтів [33]. За кольором ґрунту можна розрізнити різні горизонти [44], а, як відомо, уміст ГОР змінює колір ґрунту [7]. Колір може бути представлений тривимірними моделями кольорного простору та зазвичай описується як у сухих, так і вологих умовах за допомогою колірної

системи Манселла, що складається з відтінку (домінуючий спектральний колір), значення (світлота) і кольоровості (чистота кольору) [26]. З часом було розроблено інші моделі колірному простору для покращення представлення кольорів та допомоги в числових обчисленнях, наприклад CIE та його похідні (CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*u^*v^*$ та CIE UVW), набір просторів кольорів RGB (sRGB, adobe RGB і декорельований RGB), циліндричні перетворення (HSV і HSL) та простір кольорів CMYK [19, 40]. Модель простору кольорів можна перетворити на іншу модель простору кольорів (наприклад, sRGB у HSV). Для отримання точних і кількісних вимірювань кольору ґрунту було розроблено декілька пристроїв, які не використовують кольорові діаграми Манселла, такі як камери мобільних телефонів, цифрові камери та спектрофотометри ближнього інфрачервоного діапазону [9, 18, 38]. Спектрофотометри використовувалися для аналізу кольору ґрунту з 1930-х років [8], але вони ніколи не були широко використані ґрунтознавцями. Спектрометри видимого ближнього інфрачервоного діапазону (vis-NIR) вимірюють спектральний діапазон 350–2500 нм, у якому видима частина може бути використана для виділення кольорів RGB [18] і кольорів CIE [10]. Планшетні сканери, хромометри та датчики кольору є відносно недорогими пристроями для визначення колориметричних властивостей ґрунтів [21, 35]. Оскільки кольори, виміряні різними інструментами, залежать від пристрою та впливають на умови освітлення, для калібрування зображення ґрунту слід включити стандартну кольорову діаграму [3].

Використання кольору ґрунту для прогнозування вмісту органічного вуглецю. Багато властивостей ґрунту та ґрунтові умови впливають на колір ґрунту, і тому його можна використовувати для прогнозування різних властивостей ґрунту. Органічний вуглець у ґрунті (ОВ) може маскувати мінерали та затемнювати ґрунт. Вміст органічного вуглецю в ґрунті було передбачено за допомогою різних моделей колірному простору, включаючи CIE $L^*u^*v^*$ [40], CIE $L^*a^* b^*$ [34, 39], RGB [3] та колір Манселла [42]. Присутність Fe^{3+} у формі мінералів оксиду заліза може зробити ґрунт червонішим, а вміст заліза або оксиду заліза можна передбачити за кольором ґрунту [22, 39]. Малі фракції (наприклад, вміст піску та мулу) були спрогнозовані за кольором ґрунту Levin et al. [22] і Zhang and Hartemink [44]. Набір індексів вивітрювання було успішно передбачено за кольором CIE $L^*a^*b^*$ завдяки їхньому зв'язку з іншими властивостями ґрунту [45]. Карбонати та хімічний склад перехідних металів (наприклад, марганець чорного кольору) також впливають на колір ґрунту, але вони недостатньо вивчені. Ґрунтова вологість має тенденцію затемнювати ґрунт через миттєву зміну розсіювання світла, а також впливає на ступінь окиснення та відновлення елементів [6].

Stiglitz et al. [34] отримали багатообіцяльні результати при прогнозуванні вмісту органічного вуглецю в ґрунті за допомогою датчика Nix™ Pro у Південній Кароліні, США. Однак у літературі існує дуже мало робіт, присвячених дослідженню цього нещодавно представленого датчика [25, 28, 36], які вимагають подальшого тестування та перевірки. В іншій роботі автор визначив корельовані значення параметрів кольору ґрунту, отримані від датчика кольору Nix™ Pro, до системи Munsell через додаток для смартфона, показуючи багатообіцяльні можливості для майбутнього розвитку нових методів класифікації кольору ґрунту. Хоча було оцінено кореляцію між даними, наданими датчиком Nix™ Pro, і даними, отриманими колориметром [36], і продемонстровано позитивний зв'язок

між обома. Кількість зразків (31) і варіабельність кольору ґрунту були низькими, і тому такі перспективні методи потребують подальшого тестування. Звичайно, оцінювання точності датчика Nix™ Pro шляхом порівняння його даних з більш точним лабораторним обладнанням було б більш трудомістким та тривалішим [23].

Зі збільшенням поширення смартфонів і поступовим поліпшенням якості фотозображень використання фотографій зі смартфонів для прогнозування вмісту органічного вуглецю демонструє великий потенціал розвитку [3, 29]. Відомо, що колір ґрунту пов'язаний з рівнем вмісту ОВ. Наприклад, вищий вміст органічного вуглецю може призвести до темнішого кольору ґрунту [31]. Було показано, що його вплив на видиму довжину хвилі може відобразитися на кольорі фотографії, що дозволяє розробляти прогностичні дослідження на основі кореляції між кольором фотографії та вмістом ОВ [17].

Gomez-Robledo et al. [14] указали, що смартфони можна використовувати як датчики кольору ґрунту Munsell, і результати вимірювань були більш точними, ніж візуальне визначення кольору ґрунту. Дослідження показало, що значення RGB з цифрових зображень дуже релевантні вимірюванням, виконаним польовим спектрометром, а камеру можна використовувати як доступний інструмент аналізу для дослідження кольору ґрунту [22].

Fu et al. [12] використали 10-мегапіксельну камеру смартфона для зйомки фотографій і створили модель прогнозування органічних речовин на основі вологості ґрунту. Зв'язок між кольором ґрунту та його властивостями дає можливість побудувати прикладну програму для реалізації кількісної оцінки деяких показників ґрунту.

Aitkenhead [2] розробив додаток для мобільних телефонів під назвою SOCiT і досяг швидкої оцінки вмісту ґрунтової органічної речовини.

Усі ці дослідження спрогнозували вміст ГОВ та ОВ на основі фотографій, зроблених смартфонами або камерами, вказуючи умови тестування – у приміщенні або на вулиці [12], і не враховували можливий вплив відмінностей обладнання. На відміну від розпізнавання облич та інших методів, які в основному покладаються на профілі об'єктів, колір є одним із найважливіших факторів для визначення точності прогнозування органічного вуглецю. Різні апаратні конфігурації та параметри програмного забезпечення обладнання можуть спричинити відмінності в кольорах фотографій [3].

Gomez-Robledo et al. [14] припустили, що через різницю в якості камери смартфона надійність результатів була різною під час запуску однієї програми для прогнозування параметрів ґрунту на різних моделях смартфонів. Дослідники відзначили, що інформацію про колір зображення необхідно відкалібрувати за допомогою стандартного еталонного зразка в різних умовах освітлення, що підсилює здатність телефонного пристрою використовуватися в різних умовах. Інші дослідники виявили, що результати передбачення кольору з обох камер не можуть бути ефективно відкалібровані за допомогою зовнішнього стандарту. Однак систематично не досліджувалось, чи можуть відмінності в камері смартфона вплинути на прогнозування властивостей ґрунту та подальший обмін моделями [9, 12, 14].

Neil et al. [16] використали три різні цифрові камери та спектрометр, які показали однакову точність передбачення для ґрунтового органічного вуглецю. Це доказує, що навіть камери смартфонів можна використовувати для вимірювання кольору ґрунту з достатньою точністю замість дорогих камер.

Цифрові камери вводять у вимірювання просторову область, яка може усереднювати інформацію по площі, щоб зменшити шум або навіть відобразити розподіл ГОВ. Використання цифрових камер дає можливість виробникам, агрономам, а також дослідникам скоротити вартість і час аналізу ґрунту [16].

Swetha et al. [37] використовували смартфон, виготовлену на замовлення камеру для захоплення темних зображень, а також машинне навчання і алгоритми глибинного навчання, щоб передбачити текстуру ґрунту за допомогою виділених зображень із достатньою точністю. Проте, неузгодженість датчиків захоплення зображення, умов освітлення, неоднорідності ґрунту та алгоритмів ML є основними складними проблемами для прогресу характеристики ґрунту на основі смартфонів. Більшість попередніх досліджень використовували кілька алгоритмів машинного навчання/глибинного навчання (штучна нейронна мережа, Random Forest) для прогнозування вмісту ОВ за допомогою цифрових камер, що повідомляють колірні індекси [1, 24].

Gholizadeh et al. [13] використовували цифрову камеру RGB для виділення різних колірних просторів і колірних індексів, а потім передбачили SOC з R² 0,85 за допомогою алгоритму Random Forest [13].

Gorban et al. [15] при дослідженні ґрунтів Національного парку «Самарський бір» (південно-східна частина степової зони України) встановили, що кореляційний аналіз показав існування прямих і зворотних тісних зв'язків між кольоровими показниками та вмістом ГОВ. Це дало можливість побудувати моделі розрахунку вмісту в ґрунтових зразках ГОВ за значеннями коефіцієнтів яскравості та показників кольору. Автори статистично довели, що значущими виявилися моделі з використанням коефіцієнтів яскравості з довжиною хвилі 650 нм, інтегрального коефіцієнта яскравості, показника V системи HSV, показників R, G і B системи RGB, показників C, M і K системи CMYK, показників L* та b* системи L*a*b*[15].

Висновки

1. Використання методу визначення ґрунтового органічного вуглецю за кольоровими показниками ґрунту дозволяє отримувати результати стосовно вмісту ГОВ та гумусу в ґрунтах швидше, ніж за загальноприйнятими методиками.

2. Завдяки кольоровим показникам ґрунту (RGB, CMYK, CIE L*a*b*) можна визначати та прогнозувати в ґрунтах вміст органічного вуглецю та органічних речовин.

3. Для визначення вмісту ґрунтового органічного вуглецю можна використовувати камери смартфонів або комп'ютерні сканери, що дозволяє визначати та прогнозувати вміст органічного вуглецю в польових умовах.

Бібліографічні посилання

1. [Aitkenhead M. J., Coull M., Towers W., Hudson G., Black H. I. J. Prediction of soil characteristics and colour using data from the National Soils Inventory of Scotland // Geoderma. 2013. 200e201. P. 99e107.](#)

2. [Aitkenhead M. J. The E-SMART project. 2013. http://www.hutton.ac.uk/research/groups/information-and-computational-sciences/esmart.](http://www.hutton.ac.uk/research/groups/information-and-computational-sciences/esmart)

3. [Aitkenhead M. J., Donnelly D., Coull M.C., Gwatkin R. Estimating soil properties with a mobile phone Digital Soil Morphometrics // In: Progress in Soil Science. Springer International Publishing. 2016. P. 89-110.](#)

4. [Angelopoulou T., Balafoutis A., Zalidis G., Bochtis D.](#) From laboratory to proximal sensing spectroscopy for soil organic carbon estimation – A review // *Sustainability*. 2020. 12(2). P. 443-467.
5. [Balafoutis A., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., Wal T., Soto I., Go'mez-Barbero M., Barnes A., Eory V.](#) Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation farm productivity and economics // *Sustainability*. 2017. 9(8). P. 1339-1367.
6. [Ben-Dor E., Irons J., Epema G.](#) Soil reflectance. Manual of Remote Sensing: Remote Sensing for Earth Science // Rencz AN Ryerson RA Eds. 1999. P. 111-187.
7. [Buol S. W., Southard R. J., Graham R. C., McDaniel P. A.](#) Soil Genesis and Classification. John Wiley & Sons. 2011.
8. [Carter W.](#) Color analysis of soils with spectrophotometer // *Am. Soil Surv. Assoc. Bull.* 1931. 12. P. 169-170.
9. [Fan Z., Herrick J. E., Saltzman R., Matteis C., Yudina A., Nocella N., Crawford E., Parker R., Van Zee J.](#) Measurement of soil color: a comparison between smartphone camera and the Munsell color charts // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2017. 81. P. 1139-1146.
10. [Fernandez R. N., Schulze D. G.](#) Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1987. 51. P. 1277-1282.
11. [Florinsky I. V., Eilers R. G., Manning G. R., Fuller L. G.](#) Prediction of soil properties by digital terrain modeling // *Environ. Modell. Softw.* 2002. 17(3). P. 295-311.
12. [Fu Y., Taneja P., Lin S., Ji W., Adamchuk V., Daggupati P., Biswas A.](#) Predicting soil organic matter from cellular phone images under varying soil moisture // *Geoderma*. 2020. 361. P. 114020.
13. [Gholizadeh A., Saberioon M., Viscarra Rossel R. A., Boruvka L., Klement A.](#) Spectroscopic measurements and imaging of soil colour for field scale estimation of soil organic carbon // *Geoderma*. 2020. 357. P. 113972.
14. [Gomez-Robledo L., Lopez-Ruiz N., Melgosa M., Palma A. J., Capitan-Vallvey L. F., Sanchez-Maranon M.](#) 2013. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. *Comput. Electron. Agric.* 99 200-208.
15. [Gorban V. Huslysty A. Recio Espejo J. M. Bilova N.](#) Prediction of SOC in Calcic Chernozem in the steppe zone of Ukraine using brightness and colour indicators // *Ekológia (Bratislava)*. 2021. 40(4). P. 325-336.
16. [Heil J., Jörges C., Stumpe B.](#) Evaluation of using digital photography as a cost-effective tool for the rapid assessment of soil organic carbon at a regional scale // *Soil Security*. 2022. 6. P. 100023.
17. [Heil J., Marschner B., Stumpe B.](#) Digital photography as a tool for microscale mapping of soil organic carbon and iron oxides // *Catena*. 2020. 193. P. 104610.
18. [Islam K., McBratney A., Singh B.](#) Estimation of soil colour from visible reflectance spectra. *SuperSoil 2004 3rd*.
19. [Joblove G. H., Greenberg D.](#) Color spaces for computer graphics // *Comput. Graphics*. 1978. 12. 20-25.
20. [Kirschbaum M. U. F.](#) Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? // *Biogeochemistry*. 2000. 48(1). P. 21-51.

21. [Konen M. E., Burras C. L., Sandor J. A. Organic carbon texture and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in North Central Iowa // Soil Sci. Soc. Am. J. 2003. 67. P. 1823-1830.](#)
22. [Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments // Int. J. Remote Sens. 2005. 26. P. 5475-5492.](#)
23. [Mancini M., Weindorf D. C., Monteiro M. E. C., de Faria Á. J. G., dos Santos Teixeira A. F., de Lima W., de Lima F. R. D., Dijair T. S. B., Marques F. D., Ribeiro D., Silva S. H. G., Chakraborty S., Curi N. From sensor data to Munsell color system: Machine learning algorithm applied to tropical soil color classification via Nix™ Pro sensor // Geoderma. 2020. 375. P. 114471.](#)
24. [Morais P. A. O., de Souza D. M., Madari B. E., Soares A. S., de Oliveira A. E. Using image analysis to estimate the soil organic carbon content // Microchemical Journal. 2019. 147. P. 0775e781.](#)
25. [Moritsuka N., Matsuoka K., Katsura K., Sano S., Yanai J. Soil color analysis for statistically estimating total carbon total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils // Soil Sci. Plant Nutr. 2014.](#)
26. [Munsell A.H. A Color Notation. Munsell Color Company. 1919](#)
27. [Orr H. G., Wilby R. L., McKenzie Hedger M., Brown I. Climate change in the uplands: a UK perspective on safeguarding regulatory ecosystem services // Climate Res. 2008. 37. P. 77-98.](#)
28. [Raeesi M., Zolfaghari A. A., Yazdani M. R., Gorji M., Sabetizade M. Prediction of soil organic matter using an inexpensive colour sensor in arid and semiarid areas of Iran // Soil Res. 2019.](#)
29. [Rodionov A., Pa'tzold S., Welp G., Pallares R. C., Damerow L., Amelung W. Sensing of soil organic carbon using visible and near-infrared spectroscopy at variable moisture and surface roughness // Soil Sci. Soc. Am. J. 2014. 78\(3\). 949-957.](#)
30. [Rossel R.V. The soil spectroscopy group and the development of a global soil spectral library // NIR. News. 2009. 20\(4\). P. 14-15.](#)
31. [Schulze D.G. Nagel J.L. Van Scoyoc G.E. Henderson T.L. Baumgardner M.F. Scott D.E. Significance of organic matter in determining soil colors. Soil Color // Soil Science Society of America Madison. 1993. WI. P. 71-90.](#)
32. [Simon T., Zhang Y., Hartemink A. E., Huang J., Walter C., Yost J. L. Predicting the color of sandy soils from Wisconsin USA // Geoderma. 2020. 361. P. 114039.](#)
33. [Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy 12th edition. USDA-Natural Resources Conservation Service Washington DC. 2014.](#)
34. [Stiglitz R., Mikhailova E., Post C., Schlautman M., Sharp J. Using an inexpensive color sensor for rapid assessment of soil organic carbon // Geoderma. 2017. 286. P. 98-103.](#)
35. [Stiglitz R., Mikhailova E., Post C., Schlautman M., Sharp J., Pargas R., Glover B., Mooney J. Soil color sensor data collection using a GPS-enabled smartphone application // Geoderma. 2017. 296. P. 108-114.](#)
36. [Stiglitz R., Mikhailova E., Post C., Schlautman M., Sharp J. Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color // Comput. Electron. Agric. 2016. 121. P. 141-148.](#)

37. [Swetha R. K., Bende P., Singh K., Gorthi S., Biswas A., Li B. Predicting soil texture from smartphone-captured digital images and an application // Geoderma. 2020. 376. P. 114562.](#)
38. [Valeeva A. A., Aleksandrova A. B., Kuposov G. F. Color estimation of forest-steppe soils by digital photography under laboratory conditions // Eurasian Soil Science. 2016. 49. P. 1033-1037.](#)
39. [Viscarra Rossel R.A., Fouad Y., Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents // Biosyst. Eng. 2008. 100. P. 149-159.](#)
40. [Viscarra Rossel R. A., Minasny B., Roudier P., McBratney A. B. Colour space models for soil science // Geoderma. 2006. 133. P. 320-337.](#)
41. [Viscarra Rossel R. A., Webster R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra // Eur. J. Soil Sci. 2011. 62\(4\). P. 637-647.](#)
42. [Wills S. A., Burras C. L., Sandor J. A. Prediction of soil organic carbon content using field and laboratory measurements of soil color // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. 71. P. 380-388.](#)
43. [Yang J., Shen F., Wang T., Luo M., Li N., Que S. Effect of smart phone cameras on color-based prediction of soil organic matter content // Geoderma. 2021. 402. P. 115365.](#)
44. [Zhang Y., Hartemink A. E. A method for automated soil horizon delineation using digital images // Geoderma. 2019. 343. P. 97-115.](#)
45. [Zhang Y., Hartemink A. E. Digital mapping of a soil profile // Eur. J. Soil Sci. 2019. 70. P. 27-41.](#)

Надійшла до редколегії 22.11.2022 р.